ПРОЦЕССЫ И МАШИНЫ АГРОИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ
PROCESSES AND MACHINES OF AGRO - ENGINEERING SYSTEMS



УДК 581.1 DOI 10.12737/12598

Расчет подъема воды в криволинейных капиллярах по углу наклона касательной к мениску*

И. А. Кипнис[1], Ю. М. Вернигоров[2]**

[1]ООО «Научно-производственная фирма “КАСИОР”», г. Москва, Российская Федерация
[2]Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Calculation of water rise in curvilinear capillaries by tangent angle to the meniscus***

I. A. Kipnis[1], Y. M. Vernigorov[2]**

[1]“KASIOR” Research and Production Company LLC, Moscow, Russian Federation
[2] Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Целями данной работы являются моделирование распределения воды в многоуровневых симметричных капиллярных системах с криволинейными капиллярами, а также расчет подъема воды в криволинейных капиллярах по углу наклона к горизонтали касательной к мениску воды в капилляре. Для полного описания продвижения воды в криволинейных ветвях разных уровней определены координаты менисков воды в этих уровнях относительно осей *y* и *x*, связанных, соответственно, с осью вертикального капилляра и поверхностью воды. При прочих равных условиях величина продвижения воды в криволинейных капиллярах всегда больше, чем в прямолинейных. Полученные результаты полезны при изучении проводимости сосудов ксилемы и продвижения почвенной влаги в структурах растения, что напрямую связано с подъемом и распределением воды в ксилеме. Показано, что по мере увеличения количества уровней угол наклона касательной к менискам воды в криволинейных ветвях уменьшается по сравнению с первой криволинейной ветвью. Уменьшение этого угла показывает, что вода в криволинейных ветвях продвигается тем меньше, чем больше номер уровня.

Ключевые слова: многоуровневый криволинейный капилляр, ветвь, ксилема, транспирация, растение, модель.

The work objectives are the simulation of the water distribution in the symmetric multilevel capillary systems with curvilinear capillaries, and the calculation of water rise in the curvilinear capillaries by the angle of inclination to the horizontal tangent to the water meniscus in the capillary. For a complete description of the water advance in the curvilinear branches of different levels, the coordinates of the water menisci in those levels about the axes y and x related respectively to the vertical capillary axis and the water surface are determined. Ceteris paribus, the value of water movement in the curvilinear capillaries is always greater than in the straight ones. The results obtained are useful in studying the conductivity of xylem vessels and the promotion of soil moisture in the plant structures which is directly related to the rising and distribution of water in the xylem. It is shown that with increase of the number of levels, the tangent angle to the water menisci in the curvilinear branches is reduced in comparison with the first curvilinear branch. The reduction of this angle indicates that the water in the curvilinear branches is moving the less, the higher the level number is.

Keywords: multilevel curvilinear capillary, branch, xylem, transpiration, plant, model.

Введение. Поступление и продвижение почвенной влаги в растении изучается не менее 200 лет. Результаты исследований изложены в монографиях по физиологии растений — например, [1, 2]. Но интерес к продолжению изысканий в этой области не ослабевает. Так, при изучении проводимости сосудов ксилемы экспериментально установлено, что диаметр и проводимость сосудов первичной и вторичной ксилем связаны с количеством почвенной влаги [3, 4]. В [5] рассматривается роль древесных структур как хранилищ воды. Данный вопрос напрямую связан с ее подъемом и распределением в ксилеме. В работах [6, 7] нами исследованы модели продвижения воды в ветвящихся многоуровневых

*Работа выполнена в рамках инициативной НИР.
**E-mail: ikipnis@yandex.ru, jvernigorov@dstu.edu.ru
***The research is done within the frame of the independent R&D.

прямолинейных капиллярных системах. Показано, что распределение воды в наклонных ветвях подчиняется общему правилу: в ветвях самого нижнего уровня вода продвигается дальше, чем в ветвях уровней, расположенных выше. При этом вода в вертикальном капилляре поднимется тем выше, чем больше боковых ветвей в капиллярной системе. Авторами [7] рассмотрены модели продвижения воды в капиллярных системах древесных стволов с учетом возможности ее горизонтального перемещения в сосудах ксилемы. Получено соотношение площадей капилляров по высоте ствола, обеспечивающее подъем воды в сосудах ксилемы. Выявлены соотношения для определения продвижения воды в криволинейных капиллярах, описываемых различными математическими функциями. В частности, рассмотрены ветви, вид которых описывается степенными и показательными функциями. Распределение воды в таких криволинейных ветвях и вертикальном капилляре аналогично полученному в [6]. Отличие состоит в том, что при прочих равных условиях объем воды в криволинейных капиллярах всегда больше, чем в прямолинейных. Авторы [8] с помощью фазово-контрастной рентгеновской томографии изучили механизм движения воды в сосудах растения и положение водного мениска в эмболированных газом сосудах.

Однако до настоящего времени не описана методика, позволяющая рассчитывать распределение воды в многоуровневых капиллярных системах с криволинейными капиллярами (каковыми являются реальные растения [9]) и определять положение в них водного мениска.

Цели работы:

— моделирование распределения воды в многоуровневых симметричных капиллярных системах с криволинейными капиллярами;

— расчет подъема воды в криволинейных капиллярах по углу наклона к горизонтали касательной к мениску воды в капилляре;

— определение координат менисков воды в капиллярах различных уровней.

Основная часть. Рассмотрим продвижение воды в капиллярной системе, имеющей криволинейные ветви второго яруса (рис. 1), которые, как и ветви первого уровня, описываются уравнением $f(x) = h = k\,x^n$.

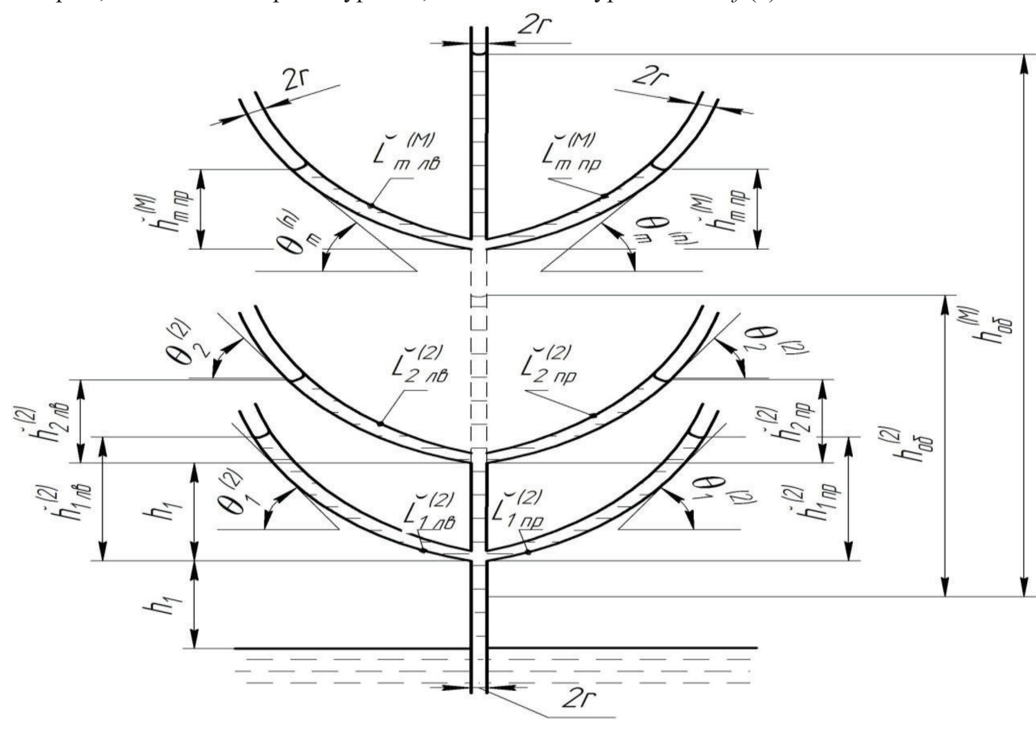


Рис. 1. Многоуровневый криволинейный капилляр

Для простоты положим, что радиусы всех капилляров равны r, расстояние между ветвями первого и второго яруса равно h_1.

Примем следующие обозначения для величин L, h и θ:

— верхний индекс показывает общее количество уровней боковых ветвей в рассматриваемой модели;

— нижний индекс показывает номер уровня, к которому относится рассматриваемая величина;

— дуга над L, h показывает, что рассматриваемая величина относится к криволинейной капиллярной системе.

В нижней части вертикального капилляра между поверхностью воды и боковыми криволинейными ветвями первого уровня (высота h_1) на воду действуют пять одинаковых сил поверхностного натяжения в менисках двухуровневой системы.

Силы поверхностного натяжения в криволинейных капиллярах второго уровня одновременно воздействуют:
— на часть воды вертикального капилляра (пропорционально одной пятой высоты h_1);
— на отрезок вертикальной части капилляра высотой h_1 между первым и вторым уровнями (пропорционально одной трети h_1).

Таким образом, уравнение $y(x) = h_1 + k\,x^n$ для ветвей второго уровня может быть записано в виде

$$f(x) = h = \frac{1}{3}h_1 + \frac{1}{5}h_1 + k\,x^n,$$

откуда $f^*(x) = tg\,\theta$, и, учитывая, что $x = \sqrt[n]{\frac{h-\left(\frac{1}{3}+\frac{1}{5}\right)h_1}{k}}$, получим

$$\theta_{(2)}^{(2)} = arctg\,[k\,n\,(\sqrt[n]{\frac{h-(\frac{1}{3}+\frac{1}{5})h_1}{k}})^{n-1}].$$

Приведенные соотношения позволяют сделать следующий вывод. В криволинейных капиллярах в ветвях второго уровня вода продвигается так же, как если бы в системе был только один уровень — то есть два криволинейных капилляра, симметрично расположенных в одном уровне относительно вертикального. Это верно при условии, что сила поверхностного натяжения в этом капилляре поднимает объем воды, пропорциональный не высоте h_1, а высоте $(\frac{1}{3}+\frac{1}{5})h_1$, что приводит к изменению угла наклона касательной к мениску.

Используя эти рассуждения, можно записать уравнения для продвижения воды в каждой из капиллярных ветвей двухуровневой системы.

Для ветвей первого уровня:

$$\theta_1^{(2)} = arctg\,[kn\,(\sqrt[n]{\frac{h-\frac{1}{5}h_1}{k}})^{n-1}], \quad (1)$$

$$\frac{1}{5}\,\pi r^2\rho g\,h_1 + \pi r^2\rho g\,\breve{L}_{1(\text{пр})}^{(1)}(x) = 2\,\pi r\sigma\,cos\,\alpha, \quad (2)$$

$$\frac{1}{5}\,\pi r^2\rho g\,h_1 + \pi r^2\rho g\,\breve{L}_{1(\text{лв})}^{(1)}(x) = 2\,\pi r\sigma\,cos\,\alpha. \quad (3)$$

Для ветвей второго уровня:

$$\theta_2^{(2)} = arctg\,[k\,n\,(\sqrt[n]{\frac{h-\left(\frac{1}{3}+\frac{1}{5}\right)h_1}{k}})^{n-1}], \quad (4)$$

$$\frac{1}{5}\,\pi r^2\rho g\,h_1 + \frac{1}{3}\,\pi r^2\rho g\,h_1 + \pi r^2\rho g\,\breve{L}_{2(\text{пр})}^{(2)}(x) = 2\,\pi r\sigma\,cos\,\alpha, \quad (5)$$

$$\frac{1}{5}\,\pi r^2\rho g\,h_1 + \frac{1}{3}\,\pi r^2\rho g\,h_1 + \pi r^2\rho g\,\breve{L}_{2(\text{лв})}^{(2)}(x) = 2\,\pi r\sigma\,cos\,\alpha. \quad (6)$$

Для вертикального капилляра:

$$\pi r^2\rho g\,(\breve{h}_{2\text{об}}^{(2)} - 2h_1) + \frac{1}{3}\,\pi r^2\rho g\,h_1 + \frac{1}{5}\,\pi r^2\rho g\,h_1 = 2\,\pi r\sigma\,cos\,\alpha. \quad (7)$$

Приведем решения уравнений (2), (3), (5)–(7) относительно величин продвижения воды в капиллярах и в вертикальной ветви.

Для ветвей первого уровня:

$$\breve{L}_{1(\text{пр})}^{(2)} = \breve{L}_{1(\text{лв})}^{(2)} = (h - \frac{1}{5}\,h_1)/(1 - cos\,arctg\,[kn(\sqrt[n]{\frac{h-\frac{1}{5}h_1}{k}})^{n-1}]). \quad (8)$$

Для ветвей второго уровня:

$$\breve{L}_{2(\text{пр})}^{(2)} = \breve{L}_{2(\text{лв})}^{(2)} = (h - (\frac{1}{3} - \frac{1}{5})\,h_1)/(1 - cos\,arctg[kn(\sqrt[n]{\frac{h-(\frac{1}{3}+\frac{1}{5})h_1}{k}})^{n-1}]). \quad (9)$$

Для вертикальной ветви:

$$\breve{h}_{2\text{об}}^{(2)} = h + (2 - \frac{1}{3} - \frac{1}{5})\,h_1. \quad (10)$$

Из соотношений (8)–(10) видно, что наличие капилляров второго уровня обусловливает увеличение высоты подъема воды в вертикальной части и увеличение продвижения воды в капиллярах первого уровня. Действительно, определяя из (8) и (9) высоты подъема воды и составляя их разность, получим

$$\breve{h}_{1(\text{пр})(\text{лв})}^{(1)} - \breve{h}_{1(\text{пр})(\text{лв})}^{(2)} = (h - \frac{1}{5}\,h_1) - (\,h - (\frac{1}{3} + \frac{1}{5})\,h_1) = \frac{1}{3}\,h_1, \quad (11),$$

т. е. увеличивается высота подъема воды в нижнем капилляре, а следовательно, и значения ее продвижения $\breve{L}^{(1)}_{1(\text{пр})}$ и $\breve{L}^{(1)}_{1(\text{лв})}$ в ветвях нижнего уровня. Об этом также свидетельствует изменение угла наклона касательных к мениску воды в капиллярах первого и второго уровней.

Следуя представленной выше логике рассуждений и вводя соответствующие обозначения для ветвей, например, 5-го уровня, предположим, что расстояние между всеми уровнями равно h_1. Таким образом получим следующие соотношения:

$$\theta^{(5)}_1 = arctg\ [k\ n\ (\sqrt[n]{\frac{h-\frac{1}{11}h_1}{k}})^{n-1}], \tag{12}$$

$$\theta^{(5)}_2 = arctg[kn(\sqrt[n]{\frac{h-\left(\frac{1}{9}+\frac{1}{11}\right)h_1}{k}})^{n-1}], \tag{13}$$

$$\theta^{(5)}_3 = arctg[kn\ (\sqrt[n]{\frac{h-\left(\frac{1}{7}+\frac{1}{9}+\frac{1}{11}\right)h_1}{k}})^{n-1}], \tag{14}$$

$$\theta^{(5)}_4 = arctg[kn\ (\sqrt[n]{\frac{h-\left(\frac{1}{5}+\frac{1}{7}+\frac{1}{9}+\frac{1}{11}\right)h_1}{k}})^{n-1}], \tag{15}$$

$$\theta^{(5)}_5 = arctg[kn\ (\sqrt[n]{\frac{h-\left(\frac{1}{3}+\frac{1}{5}+\frac{1}{7}+\frac{1}{9}+\frac{1}{11}\right)h_1}{k}})^{n-1}]. \tag{16}$$

Если в системе M уровней, то

$$\theta^{(\text{M})}_m = arctg\ [k\ n\ (\sqrt[n]{\frac{h-h_1\sum^{m}_{(M)}\frac{1}{2m+1}}{k}})^{n-1}], \tag{17}$$

где M — количество уровней в капиллярной системе; m — номер рассматриваемого уровня.

Отсчет уровней в (17) следует вести сверху вниз.

Соотношения для величины продвижения воды в криволинейных капиллярах и высоты ее подъема в вертикальной ветви для пятиуровневой системы принимают следующий вид:

$$\breve{L}^{(5)}_{1(\text{пр})} = \breve{L}^{(5)}_{1(\text{лв})} = (h-\frac{1}{11}h_1)/(1-cos\ arctg[kn\ (\sqrt[n]{\frac{h-\frac{1}{11}h_1}{k}})^{n-1}]), \tag{18}$$

$$\breve{L}^{(5)}_{2(\text{пр})} = \breve{L}^{(5)}_{2(\text{лв})} = (h-(\frac{1}{9}+\frac{1}{11})h_1)/(1-cos\ arctg[kn(\sqrt[n]{\frac{h-\left(\frac{1}{9}+\frac{1}{11}\right)h_1}{k}})^{n-1}]), \tag{19}$$

$$\breve{L}^{(5)}_{3(\text{пр})} = \breve{L}^{(5)}_{3(\text{лв})} = (h-(\frac{1}{7}+\frac{1}{9}+\frac{1}{11})h_1)/(1-cosarctg[kn(\sqrt[n]{\frac{h-\left(\frac{1}{7}+\frac{1}{9}+\frac{1}{11}\right)h_1}{k}})^{n-1}]), \tag{20}$$

$$\breve{L}^{(5)}_{4(\text{пр})} = \breve{L}^{(5)}_{4(\text{лв})} = (h-(\frac{1}{5}+\frac{1}{7}+\frac{1}{9}+\frac{1}{11})h_1)/(1-cosarctg[kn(\sqrt[n]{\frac{h-(\frac{1}{5}+\frac{1}{7}+\frac{1}{9}+\frac{1}{11})h1}{k}})^{n-1}]), \tag{21}$$

$$\breve{L}^{(5)}_{5(\text{пр})} = \breve{L}^{(5)}_{5(\text{лв})} = (h-(\frac{1}{3}+\frac{1}{5}+\frac{1}{7}+\frac{1}{9}+\frac{1}{11})h_1)/(1-cosarctg[kn(\sqrt[n]{\frac{h-(\frac{1}{3}+\frac{1}{5}+\frac{1}{7}+\frac{1}{9}+\frac{1}{11})h1}{k}})^{n-1}]), \tag{22}$$

$$\breve{h}^{(5)}_{5\text{об}} = h + (5-\frac{1}{3}-\frac{1}{5}-\frac{1}{7}-\frac{1}{9}-\frac{1}{11})\ h_1. \tag{23}$$

Общие выражения для криволинейной капиллярной системы из M уровней могут быть записаны в виде:

$$\breve{L}^{(M)}_{m(\text{пр/лв})} = (h-h_1\sum^{m}_{(M)}\frac{1}{2m+1})/(1-cos\ arctg\ [kn(\sqrt[n]{\frac{h-h1\sum^{m}_{(M)}\frac{1}{2m+1}}{k}})^{n-1}]), \tag{24}$$

$$\breve{h}^{(M)}_{m\text{об}} = h + (M)\ h_1 _\ h_1\sum^{m}_{(M)}\frac{1}{2m+1}. \tag{25}$$

Сравнивая величины продвижения воды в вертикальном капилляре и в криволинейных капиллярах разных уровней, полученные в уравнениях (11)–(25), можно отметить следующее:

— в криволинейных капиллярах по мере увеличения количества уровней величина продвижения воды в каждом более высоком уровне меньше, чем в капиллярах предыдущих уровней;

— наибольший угол наклона касательной к мениску имеет место в капилляре самого нижнего уровня, и этот угол уменьшается в каждом последующем уровне;

— высота подъема воды в вертикальном капилляре увеличивается по мере роста «этажности» капиллярной системы.

Для полного описания продвижения воды в криволинейных ветвях разных уровней необходимо определить координаты менисков воды в этих уровнях относительно осей y и x, связанных, соответственно, с осью вертикального капилляра и поверхностью воды. Для решения этой задачи необходимо найти уравнение касательной к мениску для функции, заданной выражением

$$y(x) = h_1 + k\,x^n.$$

Уравнение касательной к графику функции в общем виде [10]:

$$y = f(x_0) + f'(x_0)(x - x_0). \tag{26}$$

Определим абсциссу x_0 в точке касания касательной мениска, считая угол наклона касательной θ к прямой $y = 0$ заданным.

Очевидно, что

$$f'(x_0) = tg\,\theta = k\,n\,x_0^{(n-1)}, \tag{27}$$

откуда

$$x_0 = \sqrt[(n-1)]{\frac{tg\,\theta}{kn}}. \tag{28}$$

Тогда

$$f(x_0) = h_1 + k\,\left(\sqrt[(n-1)]{\frac{tg\,\theta}{kn}}\right)^n, \tag{29}$$

$$f'(x_0) = k\,n\,\left(\sqrt[(n-1)]{\frac{tg\,\theta}{kn}}\right)^{(n-1)}. \tag{30}$$

С учетом M уровней ($1 \le m \le M$) капиллярной системы (см. (24) и (25)) уравнение касательной (26) может быть записано в виде

$$y = m\,h_1 + k\,\left(\sqrt[(n-1)]{\frac{tg\,\theta^{(m)}}{kn}}\right)^n + kn\,\left(\sqrt[(n-1)]{\frac{tg\,\theta^{(m)}}{kn}}\right)^{(n-1)}\left(x - \sqrt[(n-1)]{\frac{tg\,\theta^{(m)}}{kn}}\right) =$$
$$m\,h1 + (1-n)\,k\,\left(\sqrt[(n-1)]{\frac{tg\,\theta^{(m)}}{kn}}\right)^n + kn\,\left(\sqrt[(n-1)]{\frac{tg\,\theta^{(m)}}{kn}}\right)^{(n-1)} x. \tag{31}$$

Полагая $y = 0$, получим значение x в точке пересечения касательной оси абсцисс:

$$x_{|y=0} = -\left(m\,h_1 + (1-n)\,k\,\left(\sqrt[(n-1)]{\frac{\mathrm{tg}\,\theta^{(m)}}{kn}}\right)^n\right)\Big/\left(kn\left(\sqrt[(n-1)]{\frac{\mathrm{tg}\,\theta^{(m)}}{kn}}\right)^{(n-1)}\right). \tag{32}$$

Вычитая из (28) (32) и умножая на $tg\,\theta^{(m)}$, получим значение величины ординаты y_0 водяного мениска в m-й ветви:

$$y_0 = (x_0 - x_{\,|\,y=0})\,tg\,\theta^{(m)} = \left[\sqrt[(n-1)]{\frac{tg\,\theta^{(m)}}{kn}} + \left(m\,h_1 + (1-n)k\left(\sqrt[(n-1)]{\frac{tg\,\theta^{(m)}}{kn}}\right)^n\right)\Big/\right.$$
$$\left.\Big/\left(kn\left(\sqrt[(n-1)]{\frac{tg\,\theta^{(m)}}{kn}}\right)^{(n-1)}\right)\right]\,tg\,\theta^{(m)}. \tag{33}$$

Воспользовавшись выражением (17), можно получить соотношения для определения координат водного мениска:

$$x_0 = \sqrt[(n-1)]{\frac{tg\left[k\,n\left(\sqrt[n]{\frac{h - h1\,\sum_{(M)}^{m}\frac{1}{2m+1}}{k}}\right)^{n-1}\right]}{kn}}, \tag{34}$$

$$y_0 = \left[\sqrt[(n-1)]{\frac{tg\left[k\,n\left(\sqrt[n]{\frac{h - h1\,\sum_{(M)}^{m}\frac{1}{2m+1}}{k}}\right)^{n-1}\right]}{kn}} + \left(m\,h_1 + (1-n)\,k\left(\sqrt[(n-1)]{\frac{tg\left[k\,n\left(\sqrt[n]{\frac{h - h1\,\sum_{(M)}^{m}\frac{1}{2m+1}}{k}}\right)^{n-1}\right]}{kn}}\right)^n\right)\Big/\right.$$

$$\left.\Big/\left(kn\left(\sqrt[(n-1)]{\frac{tg\left[k\,n\left(\sqrt[n]{\frac{h - h1\,\sum_{(M)}^{m}\frac{1}{2m+1}}{k}}\right)^{n-1}\right]}{kn}}\right)^{(n-1)}\right)\right] \times tg\left[kn\left(\sqrt[n]{\frac{h - h1\,\sum_{(M)}^{m}\frac{1}{2m+1}}{k}}\right)^{n-1}\right]. \tag{35}$$

Аналогично могут быть получены соотношения продвижения воды и координаты водных менисков в капиллярах, описываемых другими математическими функциями.

В таблице 1 представлены углы наклона касательной к мениску в градусах, определенные как величина арктангенсов для двух-, трех-, четырех- и пятиуровневых систем, вычисленные с точностью до 10'.

Таблица 1

Углы наклона касательной к менискам при изменении *M* от 2 до 5

№ уровня	k_1				
	0,2	0,4	0,5	0,6	0,8
Двухуровневая система					
1	63^{0}	$62^{0}30'$	$62^{0}17'$	$61^{0}54'$	$61^{0}24'$
2	$62^{0}6'$	$60^{0}30'$	$59^{0}36'$	$58^{0}30'$	$56^{0}18'$
Трехуровневая система					
1	$63^{0}6'$	$62^{0}48'$	$62^{0}36'$	$62^{0}24'$	62^{0}
2	$62^{0}30'$	$61^{0}42'$	$61^{0}20'$	$60^{0}42'$	$59^{0}36'$
3	$61^{0}42'$	$59^{0}42'$	$58^{0}24'$	57^{0}	$53^{0}36'$
Четырехуровневая система					
1	$63^{0}12'$	$62^{0}54'$	$62^{0}48'$	$62^{0}36'$	$62^{0}18'$
2	$62^{0}48'$	$62^{з}12'$	$61^{0}48'$	$61^{0}30'$	$60^{0}42'$
3	$62^{0}18'$	$61^{0}6'$	$60^{0}24'$	$59^{0}36'$	$57^{0}54'$
4	$61^{0}24'$	$58^{0}48'$	$57^{0}18'$	$55^{0}24'$	$50^{0}30'$
Пятиуровневая система					
1	$63^{0}12'$	63^{0}	$62^{0}54'$	$62^{0}48'$	$62^{0}36'$
2	$62^{0}54'$	$62^{0}24'$	$62^{0}12'$	$61^{0}54'$	$61^{0}24'$
3	$62^{0}36'$	$61^{0}42'$	$61^{0}12'$	$60^{0}42'$	$59^{0}36'$
4	$62^{0}6'$	$60^{0}30'$	$59^{0}36'$	$58^{0}42'$	$56^{0}24'$
5	$61^{0}12'$	$58^{0}12'$	$56^{0}18'$	54^{0}	$47^{0}24'$

Анализ данных таблицы позволяет сделать вывод, что при $k_1 = 0{,}2$ разница в величине углов для первого и второго уровней составляет 1 и 2^0, а при $k_1 = 0{,}6 – 3^0$ и 8^0 — соответственно, для двух- и пятиуровневой систем. Кроме того, в двухуровневой системе при изменении k_1 от 0,2 до 0,8 величина угла изменяется для ветвей первого нижнего уровня на 2^0, а для ветвей второго уровня на 6^0. Для пятиуровневой системы при изменении k_1 в тех же пределах величина угла изменяется на 1^0 для первого уровня и на 14^0 — для пятого.

Выводы.

1. В капиллярных системах с криволинейными боковыми ветвями величина продвижения воды характеризуется углом наклона касательной к водному мениску в капиллярной ветви.

2. По мере увеличения количества уровней угол наклона касательной к менискам в криволинейных ветвях уменьшается по сравнению с первой криволинейной ветвью. Уменьшение этого угла показывает, что вода в криволинейных ветвях продвигается тем меньше, чем больше номер уровня.

Библиографический список

1. Кузнецов, В. В. Физиология растений / В. В. Кузнецов, Г. А. Дмитриева. — 2-е изд., перераб. и доп. — Москва : Высшая школа, 2006. — 742 с.

2. Taiz, L. Plan Physiology / L. Taiz, E. Zeiger — 3rd edition. — Sinauer Associates Inc., 2002. — 690 p.

3. Comparison of root anatomy and xylem vessel structure in rain-fed and supplementary irrigated «Yaghooti — Syah Shiraz» grapevine / H. Rajaei [et al.] // Horticulture, Environment and Biotechnology. — 2013. — Vol. 54, issue 4. — P. 297–302.

4. Gloser, V. Analysis of anatomical and functional traits of xylem in Humulus lupulus L. stems / V. Gloser [et al.] // Plant, Soil and Environment. — 2011. — 57 (7). — P. 338—343.

5. Hydraulic capacitance: Biophysics and Functional Significance of Internal Water Sources in Relation to Tree Size / F.-G. Scholz [et al] // Tee Physiology. — 2001. — Vol. 4. — P. 341–361.

6. Вернигоров, Ю. М. Математическое моделирование распределения жидкости в ветвящихся капиллярных системах / Ю. М. Вернигоров, И. А. Кипнис // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2010. — Т. 10, № 8 (51). —С. 1195–1206.

7. Вернигоров, Ю. М. Капиллярная модель древесных стволов / Ю. М. Вернигоров, И. А. Кипнис // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2012. — № 6 (67). — С. 24–40.

8. Кипнис, И. А. Математическая модель подъема воды в простых криволинейных капиллярах / И. А. Кипнис, Ю. М. Вернигоров // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2013. — № 5/6 (74). — С. 110–118.

9. Lee, S-J. In vivo visualization of the water-refilling process in xylem vessels using X-ray micro-imaging / S-J. Lee, Y. Kim // Annals of Botany. — 2008. — Vol. 101. — P. 595–602.

10. Бронштейн, И. Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов / И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев // Санкт-Петербург : Лань, 2009. — 608 с.

References

1. Kuznetsov, V.V., Dmitriyeva, G.A. Fiziologiya rasteniy. [Plant Physiology.] 2nd revised and enlarged ed. Moscow: Vysshaya shkola, 2006, 742 p. (in Russian).

2. Taiz, L., Zeiger, E. Plant Physiology, 3rd ed. Sinauer Associates Inc., 2002, 690 p.

3. Rajaei, H., et al. Comparison of root anatomy and xylem vessel structure in rain-fed and supplementary irrigated "Yaghooti — Syah Shiraz" grapevine. Horticulture, Environment, and Biotechnology, 2013, vol. 54, iss. 4, pp. 297-302.

4. Gloser, V., et al. Analysis of anatomical and functional traits of xylem in Humulus lupulus L. stems. Plant, Soil and Environment, 2011, no. 57 (7), pp. 338-343.

5. Scholz, F.-G., et al. Hydraulic capacitance: Biophysics and Functional Significance of Internal Water Sources in Relation to Tree Size. Tee Physiology, 2001, vol. 4, pp. 341–361.

6. Vernigorov, Y.M., Kipnis, I.A. Matematicheskoe modelirovanie raspredeleniya zhidkosti v vetvyashchikhsya kapillyarnykh sistemakh. [Mathematical modeling of liquid distribution in branch capillary systems.] Vestnik of DSTU, 2010, vol. 10, no. 8 (51), pp. 1195 – 1206 (in Russian).

7. Vernigorov Y.M., Kipnis, I.A. Kapillyarnaya model' drevesnykh stvolov. [Capillary model of tree trunks.] Vestnik of DSTU, 2012, no. 6 (67), pp. 24 – 40 (in Russian).

8. Kipnis, I.A., Vernigorov Y.M. Matematicheskaya model' pod"ema vody v prostykh krivolineynykh kapillyarakh. [Water rise mathematical model in simple curvilinear capillaries.] Vestnik of DSTU, 2013, no. 5/6 (74), pp. 110-118 (in Russian).

9. Lee, S.-J., Kim, Y. In vivo visualization of the water-refilling process in xylem vessels using X-ray micro-imaging. Annals of Botany, 2008, vol. 101, pp. 595-602.

10. Bronstein, I.N., Semendyaev, K.A. Spravochnik po matematike dlya inzhenerov i uchashchikhsya vuzov. [Handbook on mathematics for engineers and students of higher educational institutions.] St. Petersburg: Lan', 2009, 608 p. (in Russian).

Поступила в редакцию 16.02.2015
Сдана в редакцию 18.02.2015
Запланирована в номер 30.06.2015